

ディスクリート半導体熱設計の勘どころ 3

概要

本資料はディスクリート半導体の熱シミュレーションにおいて筐体、ファン、通気口（以下グリルという）、放熱器が MOSFET 熱抵抗へおよぼす影響について述べたものです。

目次

概要	1
目次	2
1. はじめに	5
2. シミュレーション結果のサマリ	5
3. 筐体シミュレーションモデルについて	6
4. MOSFET のみ配置 (モデル 1)	9
5. 実機モデル (モデル 2)	13
5.1. 吸込みファン	13
5.2. 吐出しファン	17
6. グリルの影響	20
7. 自然空冷と強制空冷	21
8. ファンとの距離	22
9. ファン性能	23
10. 内部放熱器について	24
11. 筐体放熱器について	26
製品取り扱い上のお願い	27

図目次

図 1 シミュレーションモデル 1	6
図 2 組合せモデル例	7
図 3 シミュレーションモデル 2 (例)	7
図 4 MOSFET 形状 (左) と簡易モデル (右)	7
図 5 ファンモデルおよびその P-Q 曲線の例	8
図 6 ファン A からグリル C への空気の流れ (筐体外はベクトルの方向のみ表示している)	9
図 7 MOSFET 全発熱モデルの温度分布と流速図 (左) 吸込みファン、(右) 吐出しファン	11
図 8 間隔を空けた配置の MOSFET 熱抵抗 (左) 吸込みファン、(右) 吐出しファン	12
図 9 部品配置図	13
図 10 モデル 2、吸込みファンモデルの温度分布と流速分布 (ファン A)	13
図 11 モデル 2、吸込みファンモデルの温度分布と流速分布 (ファン B)	14

図 12 モデル 2、吸込みファンモデルの温度分布と流速分布（ファン C）	15
図 13 モデル 2、吐出しファンモデルの温度分布と流速分布（ファン A）	17
図 14 モデル 2、吐出しファンモデルの温度分布と流速分布（ファン B）	18
図 15 モデル 2、吐出しファンモデルの温度分布と流速分布（ファン C）	19
図 16 グリルサイズ確認モデル	20
図 17 グリルサイズに対する MOSFET 熱抵抗	20
図 18 自然空冷モデル（左）と強制空冷モデル（右）	21
図 19 自然空冷と強制空冷の MOSFET チップ温度差	21
図 20 ファン - MOSFET 間距離を変えたシミュレーションモデル（ファンとグリルは同じ大きさ）	22
図 21 ファンからの距離に対する MOSFET 熱抵抗	22
図 22 大きい筐体での MOSFET 後方の風の流れ	22
図 23 ファンモデルの P - Q 曲線	23
図 24 解析モデル	23
図 25 ファン性能別 MOSFET 熱抵抗比較	23
図 26 放熱器の向き（左）水平、（右）垂直	24
図 27 放熱器の方向の影響確認モデル	24
図 28 放熱器周辺の流速分布	25
図 29 筐体放熱器モデル	26
図 30 筐体放熱器の効果	26

表目次

表 1 シミュレーション結果のサマリ	5
表 2 筐体上面から見た部品配置図	7
表 3 基板モデルの仕様	8
表 4 MOSFET A1～A5 までの MOSFET 熱抵抗	9
表 5 ファン A、グリル C の MOSFET 熱抵抗	10
表 6 各 MOSFET 単独発熱時の MOSFET 熱抵抗	10
表 7 全発熱モデルの各 MOSFET 熱抵抗（左）吸込みファン、（右）吐出しファン	11
表 8 間隔を空けた各 MOSFET 熱抵抗（左）吸込みファン、（右）吐出しファン	12
表 9 モデル 2、吸込みファンモデルの MOSFET 熱抵抗	15
表 10 モデル 2、吐出しファンモデルの MOSFET 熱抵抗	19

表 11 ファン性能別 MOSFET 熱抵抗 (°C/W)	23
表 12 放熱器の向きが MOSFET 熱抵抗に及ぼす影響	24
表 13 筐体放熱器の MOSFET 熱抵抗	26

1. はじめに

近年、部品の小型化や実装高密度化、消費電力大による高発熱の部品、車載などのアプリケーションなど熱設計の重要度がますます上がってきております。このような中、熱設計に関する指標の一つとしてチップ温度低減のために実測データを元にしてまとめたアプリケーションノート『ディスクリート半導体の熱設計の勘どころ』と実測では求められなかった条件をシミュレーションデータで補い、そのデータをまとめたアプリケーションノート『ディスクリート半導体の熱設計の勘どころ 2』を作成いたしました。いずれのアプリケーションノートも筐体は使わず開放状態における自然対流中での MOSFET と基板の組み合わせモデルを使いデータを得ています。

今回のアプリケーションノートでは実機を意識したモデルを考え、閉ざされた筐体や冷却用ファンを組み合わせるなどした強制空冷モデルのシミュレーションデータをまとめた『ディスクリート半導体の熱設計の勘どころ 3』を作成いたしました。すべての条件を実機で作製するのは時間やコスト的に困難ですが、ある程度の条件下での傾向把握は熱流体シミュレーションを行うことで、可能と思われます。熱設計の勘どころ 2 で述べたように基本の解析モデルを作成してしまえば解析の自由度は高くなり、コストや時間においても大幅な節約となります。

MOSFET は、ファンなどの影響を受け易い、リードタイプのデバイスを簡略化しモデルとしました。SMD タイプのパッケージは、基板への伝熱が主な放熱経路であるため強制空冷の効果を見るためには不向きと判断したためであり、今回はモデル化していません。基板は、4層基板を想定してモデル化しております。シミュレーションでは、特に風の流れによる冷却の効果などが可視化で確認できるため、熱設計時の部品の配置などの参考になります。本書は熱設計、特に筐体内での挙動をつかむための資料になればと思います。

2. シミュレーション結果のサマリ

シミュレーションは一定の条件下で行っていますので、定量的な放熱効果は条件により異なります。しかし傾向は同様に期待できますので、本シミュレーション結果のサマリを表 1 に纏めました。なお、詳細情報・データは次章以下を参照願います。

表 1 シミュレーション結果のサマリ

項目	条件	放熱効果
MOSFET 1 個配置	<ul style="list-style-type: none"> ・25箇所単体発熱 ・吸込みファンとグリルの位置変更 	<ul style="list-style-type: none"> ・ファン直近に MOSFET がある場合が最も熱抵抗が小さく、放熱効果が大きい。(最小は最大の 60%以下) ・ファンからの風はグリルに抜けるため、その経路に MOSFET を配置するのが効果的である。
MOSFET 25 個配置	<ul style="list-style-type: none"> ・25 個を配置し全発熱 ・吸込み/吐出しファンとグリル位置固定 	<ul style="list-style-type: none"> ・吸込みファンでは、流速が速く、風の流れの経路にある MOSFET は温度が下がり易い。 ・吐出しファンでは、吸込みファンより流速は遅いが、筐体内全体にほぼ同程度の流れが生じているため、MOSFET 間の温度ばらつきが少ない。 ・このことから吸込みファンは、特に高温になる部品を直接冷却する際に力を発揮し、吐出しファンは全体を隈なく冷却する際に有利。
実機モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・吸込み/吐出しファンとグリル位置変更 	<ul style="list-style-type: none"> ・ファンに近い MOSFET とグリルに近い MOSFET は熱抵抗が低く、放熱効果が大きい。 ・大きな部品の障害物がファンの正面近くにある場合、風の流れは拡散し、放熱効果は弱まる。
グリルの影響	<ul style="list-style-type: none"> ・吐出しファン ・グリルの大きさ変更 	<ul style="list-style-type: none"> ・ファン近く(グリルから遠い)の MOSFET はグリルサイズを大きくしても熱抵抗の変化は小さいが、グリルに近い MOSFET はグリルサイズを大きくすると熱抵抗は小さくなる。(最大 16%低減) 筐体内を広く冷やすためにはグリルを大きくとることが効果的である。
自然空冷と 強制空冷	<ul style="list-style-type: none"> ・自然空冷：筐体上面を全オープン ・強制空冷：吸込みファンとグリル付きの筐体 	<ul style="list-style-type: none"> ・強制空冷は自然空冷よりはるかに流速が速いため、MOSFET の許容損失は大きくなる。(約 2 倍。熱抵抗は 50%になる。)

MOSFET とファンとの距離	筐体の空間が広い/狭い	<ul style="list-style-type: none"> ・筐体空間が狭い方が、MOSFET がファンの近くから遠くまで全て熱抵抗が低い。 ・筐体空間広さによらず MOSFET がファンから遠くなるほど基本的に熱抵抗は上がる傾向。
ファン性能	吸込み/吐出しファンの風量変更	どちらのファンも風量が大きいくほど、MOSFET 熱抵抗は小さくなる。
個別放熱器	放熱器の向きと方向変更	放熱器に直接風が当り、風が当たる面積が大きいく程、熱抵抗は小さくなる。(最大 14%低減)
筐体放熱器	個別放熱器と筐体放熱器	個別放熱器と比べて、筐体を放熱器として使った場合、大幅に熱抵抗を低減できる。(50%以上低減)

3. 筐体シミュレーションモデルについて

今回は、大きく分けて2つのモデルを使用しました。1つ目のモデル1は図1、2に示すように筐体寸法が縦120×横200×高さ40mmでやや小型の電源サイズをイメージしたものです。筐体前面には、ファンが3ヶ所、後面にはグリル（吸気、排気口）が3ヶ所に付いています。これらファンとグリルは、同時に移動するのではなくそれぞれを1ヶ所ずつ動かし、解析条件に合わせてその組合せを変えてシミュレーションを行います。また、内部には筐体よりひと回り小さい基板を置いています。基板は、便宜上5×5分割したエリアに分かれていて、そのエリア1つ1つにMOSFETを置いて解析を行います。ファンとグリル位置を変えた上で、25ヶ所のMOSFET位置でのチップ温度をシミュレーションで求め、チップ温度と周囲温度間の熱抵抗（以下MOSFET熱抵抗という。）を算出しています。これによりファン、グリル、部品の配置についての知見が得られると考えました。なお、このモデルの解析領域は、この筐体内部の空間になります。したがって筐体自体が1つの境界となっており、筐体外についての解析は行っていません。

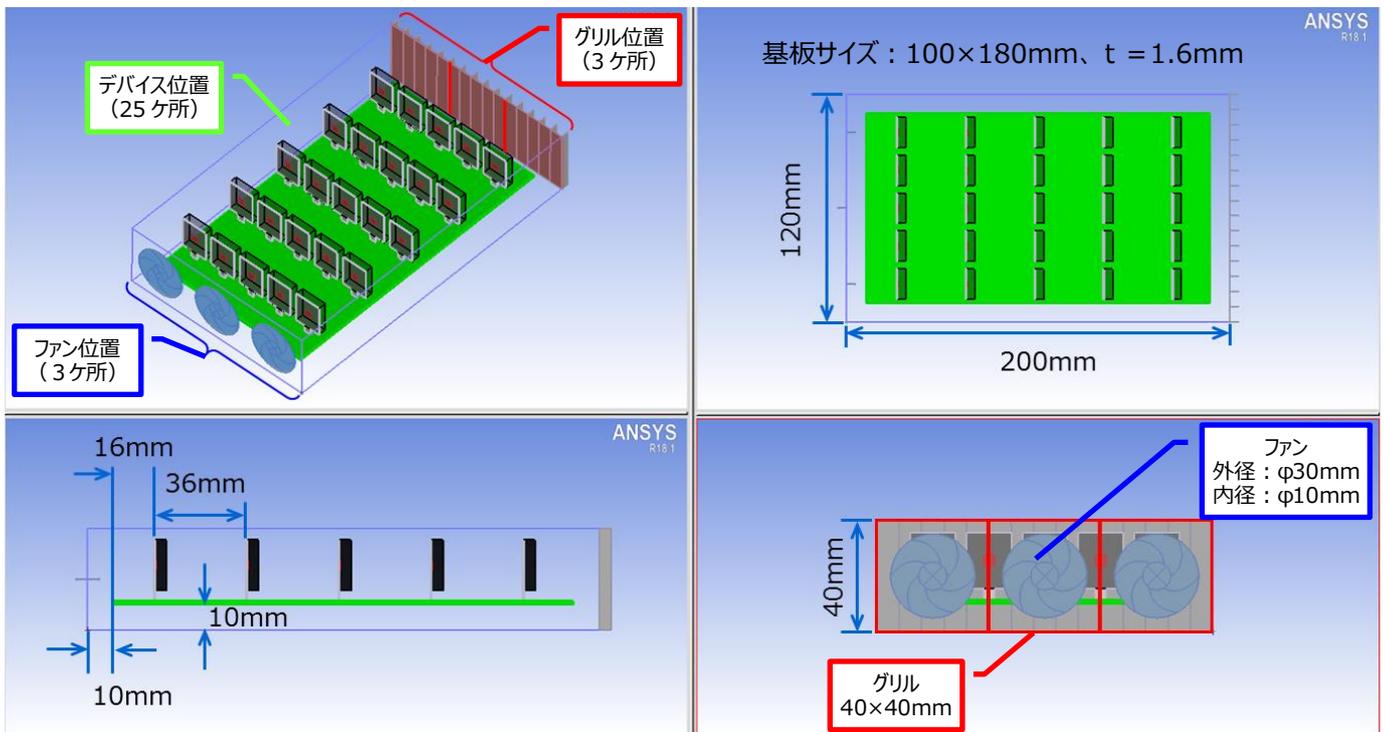
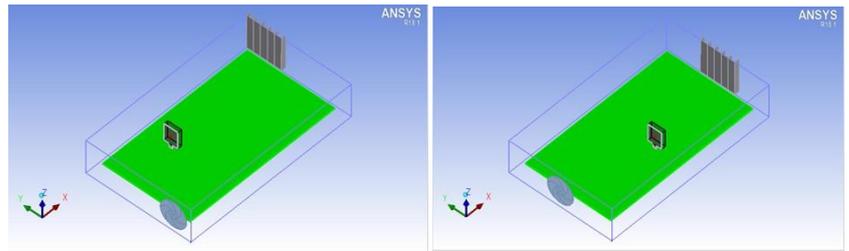


図 1 シミュレーションモデル 1

表 2 筐体上面から見た部品配置図

ファン位置	デバイス位置					グリル位置
ファン C	A5	B5	C5	D5	E5	グリル C
	A4	B4	C4	D4	E4	
ファン B	A3	B3	C3	D3	E3	グリル B
	A2	B2	C2	D2	E2	
ファン A	A1	B1	C1	D1	E1	グリル A



ファン A、グリル C、デバイス B4 のモデル ファン B、グリル B、デバイス C2 のモデル

図 2 組合せモデル例

もう一つのモデル 2 は、より実物に即したものになります。(図 3) モデル 1 が、MOSFET のみの配置でありましたが、こちらは、電解コンデンサ、コイル、インダクタ、IC などの部品をモデル化して配置しています。ただし発熱は、MOSFET のみであり、他の部品は、主に空気の流れを変えるためのものです。これにより実機に近い状態で MOSFET の温度変化を解析いたします。また、モデル 1 と異なり筐体の外まで解析領域があるため、筐体を使ったモデルの解析が可能になります。なおモデル 2 はモデル 1 同様にファン、グリル、MOSFET、その他の部品位置を自由に組み合わせられます。また、筐体サイズの可変も可能です。

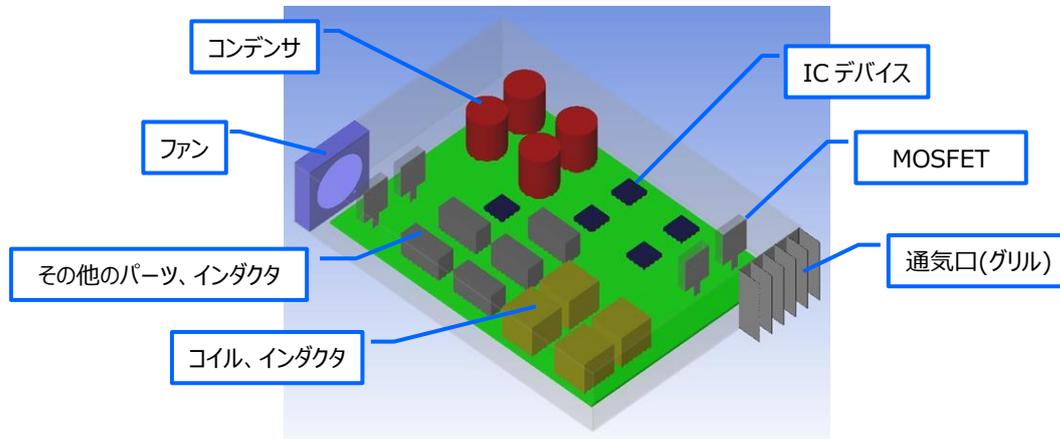


図 3 シミュレーションモデル 2 (例)

以下、モデルに関する更なる詳細について記します。

【筐体】

筐体サイズは、モデル 1 は、縦 120 mm、横 200 mm、高さ 40 mm の直方体になります。モデル 1 では 6 面全てが断熱設定となっており、熱の受渡しはありません。モデル 2 は、縦 140 mm、横 200 mm、高さ 40 mm で 6 面をアルミ板で囲んでおり筐体自体の温度解析も可能になっています。特に筐体を放熱器として使用できます。なおアルミ板の厚みは 1 mm としています。

【MOSFET】

TO-247 パッケージをモチーフとしてモデルを作成しました。解析時間削減を考慮して部品を 3 つ（モールド、チップ、リード）の構成とし、形状は、できるだけ直方体で作成してあります。これらを組み合わせて 1 つの MOSFET モデルとしております。(図 4)

なお、チップサイズは 4×4×0.25 mm としました。またチップマウント半田やワイヤなどは、今モデルでは省略してあります。

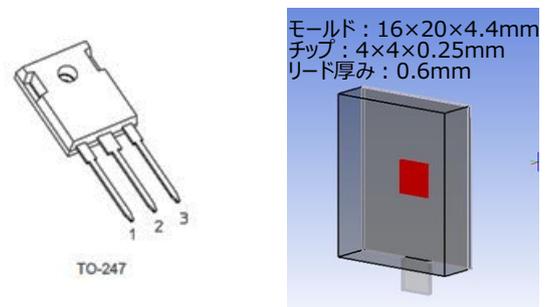


図 4 MOSFET 形状 (左) と簡易モデル (右)

【基板】

基板サイズは、モデル1が縦 100 mm、横 180 mm、厚み 1.6 mm、モデル2は縦 125 mm、横 175 mm、厚さ 1.6 mm です。どちらも4層基板で設定しています。基板の詳細設定を表3に示します。基板材料はFR4とし、4層のパターンは銅を用いており、それぞれ残存率を設定しています。またモデル2の基板の方が上下面のパターン厚が厚くなっています。これらから基板の等価熱伝導率を求めて設定しています。また基板表面の半田レジスト層などは、入れずに半田レジスト相当の放射率を設定するのみとしました。なお、今回の基板は、スルーホール、サーマルビア等の設定はしていません。

表 3 基板モデルの仕様

モデル1 基板仕様					モデル2 基板仕様				
基板サイズ(mm)	100×180	パターン厚 (μm) と残存率			基板サイズ(mm)	125×175	パターン厚 (μm) と残存率		
基板厚(mm)	1.6	上面厚さ	35	80 (%)	基板厚(mm)	1.6	上面厚さ	70	80 (%)
基板材質	FR4	下面厚さ	35	80 (%)	基板材質	FR4	下面厚さ	70	80 (%)
パターン材質	Cu	内層厚さ	35	80 (%)	パターン材質	Cu	内層厚さ	35	80 (%)
層数	4層				層数	4層			

【その他の部品】

モデル2で使用した部品は以下の4種類にしました。

- ・電解コンデンサ
- ・コイル、トランスなどのインダクタ類
- ・ICデバイス
- ・その他部品

いずれも、形状を設定し、適当な材料を設定してあります。通常、発熱を設定する部品（トランスやICデバイス）も今回は、特に発熱設定はしていません。風の流れに対する抵抗の意味合いが強いモデルを考えました。

【ファン】

ファンは、サイズを縦 40×横 40 mm に固定し、静圧 - 風量 (P - Q 曲線) データを設定してあります。(図 5(a)) 図 5(b)に P - Q 曲線データの一例を示します。今回の解析では異なる P - Q 曲線ファン同士での解析も行っておりません。

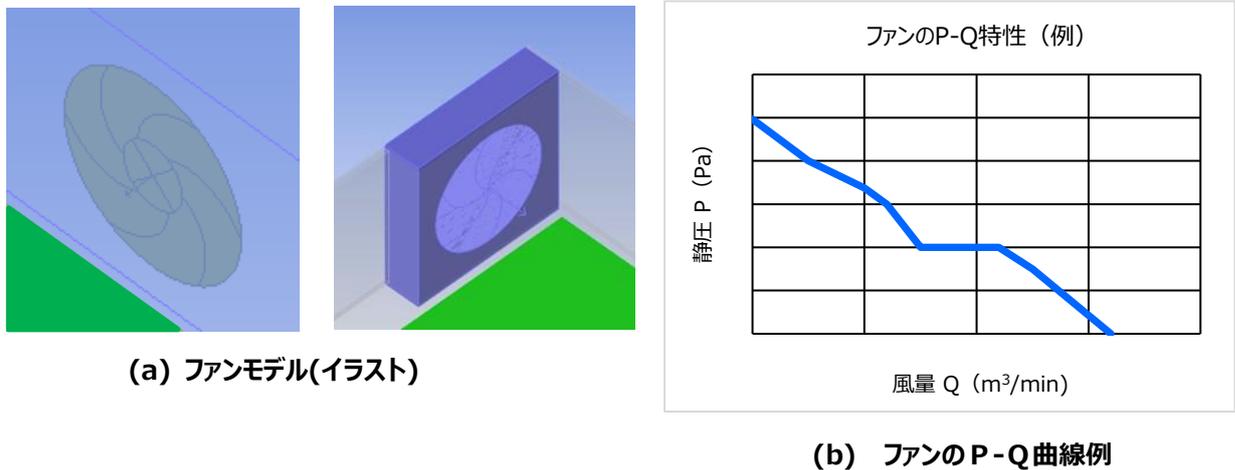


図 5 ファンモデルおよびその P-Q 曲線の例

【グリル】

筐体側壁に空気の流出入口のグリルをつけてあります。ファンの設定を吸気や排気にすることで出口や入口に変わります。なお開口率は 1.0 (100%の流れの出入口) を設定してあります。

4. MOSFET のみ配置 (モデル 1)

モデル 1 を使い、MOSFET のひとつひとつを個別に配置し、発熱させた場合のチップ温度を熱シミュレーションで求めます。発熱条件としては、MOSFET の電力損失は 2 W としています。またファンとグリルの位置を変えて個々の MOSFET 温度 (シミュレーションモデルのチップ温度を指します。) をそれぞれ求め、その値より熱抵抗を算出しております。図 6 には MOSFET A1~A5 を個々に発熱させた際の基板と MOSFET の温度分布と空気の流速ベクトル (赤: 速い、青: 遅い) を示します。

ファンから吸気された空気は、筐体の中に拡がり、グリルより排気されます。その様子をファン A 位置、グリル C 位置のモデルについて載せます。ファン A より吸気し筐体内に入った風は MOSFET に当たり、それを冷却します。一方、ファンの風が当たらない場所の MOSFET は、冷却効果が小さく熱抵抗が上昇しています。これを表 4 に示します。この場合、最大 8.8 °C/W の差になっています。同様に残りの MOSFET 熱抵抗も表 5 にまとめてみました。

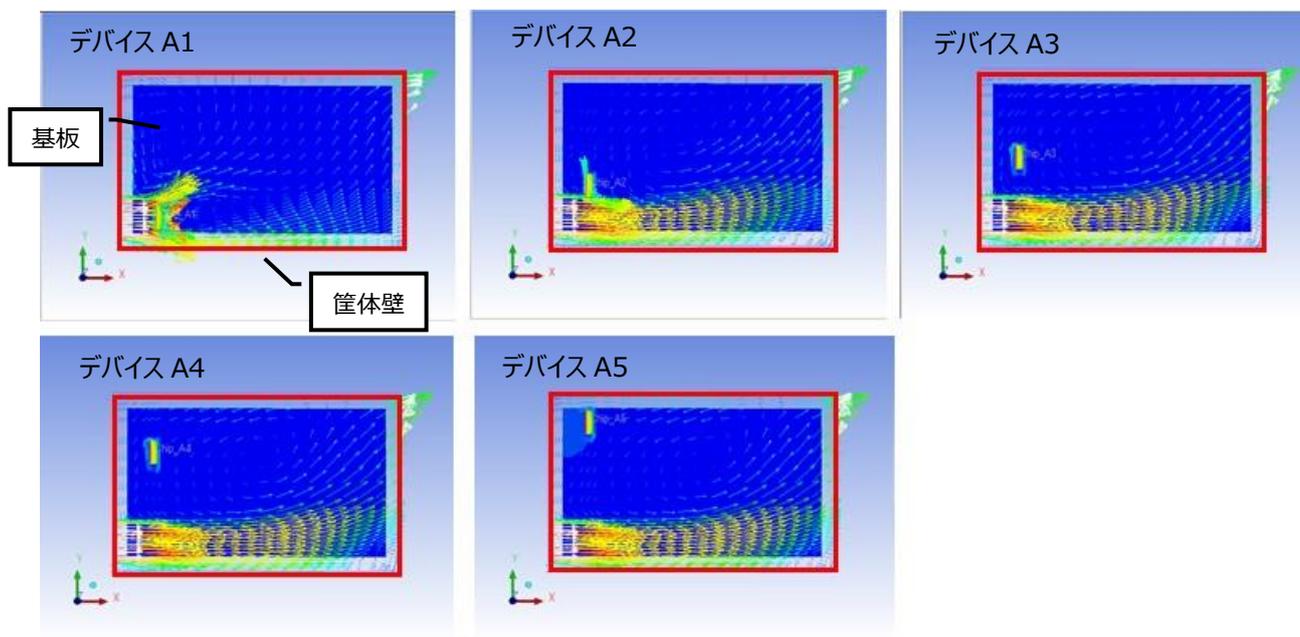


図 6 ファン A からグリル C への空気の流れ (筐体外はベクトルの方向のみ表示している)

表 4 MOSFET A1~A5 までの MOSFET 熱抵抗

ファン	グリル	MOSFET	熱抵抗 (°C/W)
A	C	A5	25.5
		A4	24.0
		A3	24.4
		A2	17.9
		A1	16.7

表 5 ファンA、グリルCの MOSFET 熱抵抗

(A) . ファン位置 A、グリル位置 C

ファン位置	デバイス位置					グリル位置
ファン C	A5	B5	C5	D5	E5	グリル C
	A4	B4	C4	D4	E4	
ファン B	A3	B3	C3	D3	E3	グリル B
	A2	B2	C2	D2	E2	
ファン A	A1	B1	C1	D1	E1	グリル A

No	MOSFET 熱抵抗 (°C/W)				
	A	B	C	D	E
5	25.5	22.5	23.3	22.5	18.8
4	24.0	24.3	23.1	20.8	18.1
3	24.4	22.6	19.3	18.2	17.9
2	17.9	17.9	17.4	17.3	18.0
1	16.7	17.2	17.6	18.2	19.3
AVE:	20.1°C/W Ta=25°C, P _D =2W				

注記：熱抵抗は ((チップ温度シミュレーション平均値) - (周囲温度)) / 電力損失で算出

ファン直近 (A1) が最も熱抵抗が低く、効果が大きいことがわかります。風は横に広がるよりはファン正面に流れる方が強いので正面の MOSFET (B1~D1) の熱抵抗は下がっています。ファンから離れると今度はグリル位置の影響で空気方向が変わってしまうため、E1 まで風が届かず熱抵抗が上がっているのがわかります。表 6 に同様に行った 3 つのモデル (ファン位置、グリル位置を変えた) のデータを示します。いずれも青線を囲まれた部分は、MOSFET 熱抵抗がモデル内 MOSFET 熱抵抗平均値より値が低かった MOSFET の位置を示しています。これを見ますとファン (吸気口) からの風はグリル (排気口) に抜けるため、その経路に MOSFET を配置するのが効果的であることがわかります。

表 6 各 MOSFET 単独発熱時の MOSFET 熱抵抗

(B) . ファン位置 B、グリル位置 B

ファン位置	デバイス位置					グリル位置
ファン C	A5	B5	C5	D5	E5	グリル C
	A4	B4	C4	D4	E4	
ファン B	A3	B3	C3	D3	E3	グリル B
	A2	B2	C2	D2	E2	
ファン A	A1	B1	C1	D1	E1	グリル A

No	MOSFET 熱抵抗 (°C/W)				
	A	B	C	D	E
5	25.1	25.3	24.1	23.7	24.6
4	18.5	18.4	18.5	17.4	18.1
3	16.7	17.4	17.8	17.3	17.1
2	18.5	18.4	18.4	17.5	18.1
1	26.1	24.7	23.5	23.3	24.3
AVE:	20.5°C/W Ta=25°C, P _D =2W				

(C) . ファン位置 B、グリル位置 C

ファン位置	デバイス位置					グリル位置
ファン C	A5	B5	C5	D5	E5	グリル C
	A4	B4	C4	D4	E4	
ファン B	A3	B3	C3	D3	E3	グリル B
	A2	B2	C2	D2	E2	
ファン A	A1	B1	C1	D1	E1	グリル A

No	MOSFET 熱抵抗 (°C/W)				
	A	B	C	D	E
5	24.8	24.4	22.8	21.0	18.4
4	18.1	18.1	17.9	17.6	17.4
3	16.8	17.4	17.8	17.9	17.9
2	18.3	19.4	21.3	22.1	20.1
1	24.7	24.0	22.7	21.5	21.6
AVE:	20.2°C/W Ta=25°C, P _D =2W				

(D) . ファン位置 A、グリル位置 B

ファン位置	デバイス位置					グリル位置
ファン C	A5	B5	C5	D5	E5	グリル C
	A4	B4	C4	D4	E4	
ファン B	A3	B3	C3	D3	E3	グリル B
	A2	B2	C2	D2	E2	
ファン A	A1	B1	C1	D1	E1	グリル A

No	MOSFET 熱抵抗 (°C/W)				
	A	B	C	D	E
5	28.5	24.6	23.1	22.7	23.2
4	24.6	23.7	23.1	22.0	19.7
3	24.6	24.2	20.8	19.0	18.0
2	18.0	17.9	17.5	17.2	17.6
1	16.7	17.2	17.5	17.9	18.9
AVE:	20.7°C/W Ta=25°C, P _D =2W				

次に、モデル 1 でファンを左下、グリルを右上に固定し、ファンが吸込みの場合と吐出しの場合を比較します。今回は 25 個の MOSFET をすべて配置して同時に発熱させました。温度分布（色分布）と流速分布（矢印分布）を図 7 に示します。この図 7 では、左がファン吸込み、右がファン吐出しになっています。これを見ると分布は、図 6 に示したような流速分布にはなっていません。これは、すべての MOSFET を同時に配置したために、単品で解析したモデルと異なる空気の流れになるためです。

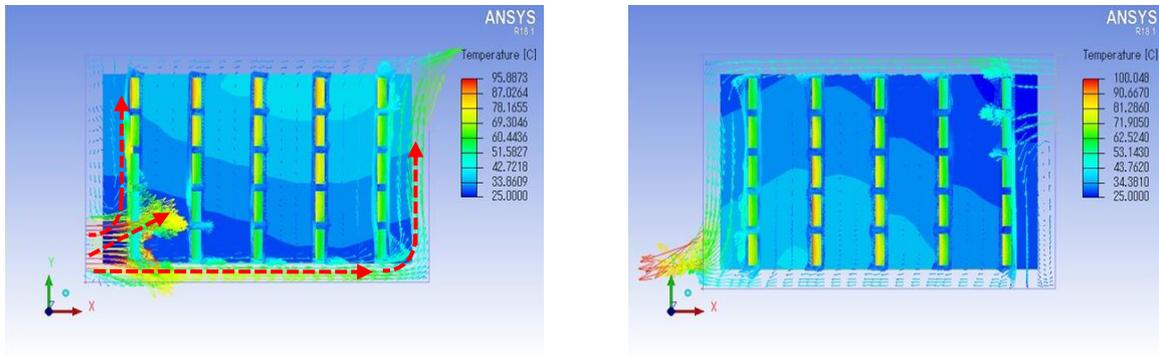


図 7 MOSFET 全発熱モデルの温度分布と流速図（左）吸込みファン、（右）吐出しファン

表 7 全発熱モデルの各 MOSFET 熱抵抗（左）吸込みファン、（右）吐出しファン

MOSFET 熱抵抗 (°C/W)					MOSFET 熱抵抗 (°C/W)						
No.	A	B	C	D	E	No.	A	B	C	D	E
5	33.3	35.3	33.8	34.3	27.8	5	23.7	27.7	26.2	23.3	19.6
4	27.4	32.7	30.7	33.0	27.2	4	26.7	33.5	29.8	25.7	20.1
3	21.0	25.6	27.9	31.8	27.5	3	26.6	35.6	32.6	28.3	22.8
2	17.7	20.9	25.0	29.0	25.6	2	27.0	36.8	34.0	30.4	28.1
1	17.0	20.7	22.5	23.9	21.1	1	30.3	37.4	34.6	31.7	30.4
Max : 35.3 Ave : 26.9 σ : 5.37					Max : 37.4 Ave : 28.9 σ : 4.92						

表 7 に吸込みファンと吐出しファンによる全発熱モデルの各 MOSFET の熱抵抗を示します。吸込みファンでは、最初の MOSFET 列で筐体沿いと MOSFET 列沿いに空気が流れるため、その方向にある MOSFET の熱抵抗が下がるのがわかります。また MOSFET の間隔は狭いため、そこを通過する空気は流速が上がっています。ファンから吸入された空気は最終的にファンと反対側の筐体面に当たり、グリル方向に流れていきます。（図 7 赤矢印）

吐出しファンでは、流速ベクトルを見ると同性能のファンであっても吸込みファンより流速は遅いことがわかります。（速度ベクトルの色によって判断：赤：速い、青：遅い）ただし流れ方に違いがあり、急速な流れがない代わりに筐体内全体にほぼ同程度の流れが生じています。冷却効果を比べるために MOSFET 熱抵抗値を見ると吸込みファンの平均値が 26.9 °C/W、吐出しファンは 28.9 °C/W でありました。これを見ると吸込みファンの方が、熱抵抗低減効果があるようです。一方、MOSFET 熱抵抗ばらつきを見ると吸込みファンが $\sigma=5.37$ 、吐出しファンは、 $\sigma=4.92$ となっており、いくらか吐出しファンの方が、ばらつきが少ない結果となりました。吸込みファンは、特に高温になる部品を直接冷却する際に力を発揮し、吐出しファンは全体を隈なく冷却する際に有利と考えられます。ただし、吐出しファンは流速が遅いためその冷却効果は、吸込みに比べて小さくなります。また部品の配置においても、ある程度、空気の流れにまかせるため、流れが十分でない部分では冷却効果が得られない場所も存在します。

さらに、MOSFET の隙間を空けたモデルの場合を図 8 に示します。間隔を空けることで空気の流れがスムーズになり吸込みファンでも吐出しファンでも MOSFET 熱抵抗の平均値は下がっています。(表 8) ファンを使用する場合は、十分な部品間隔を空けるなど空気の流れる空間を確保するのが重要と考えます。

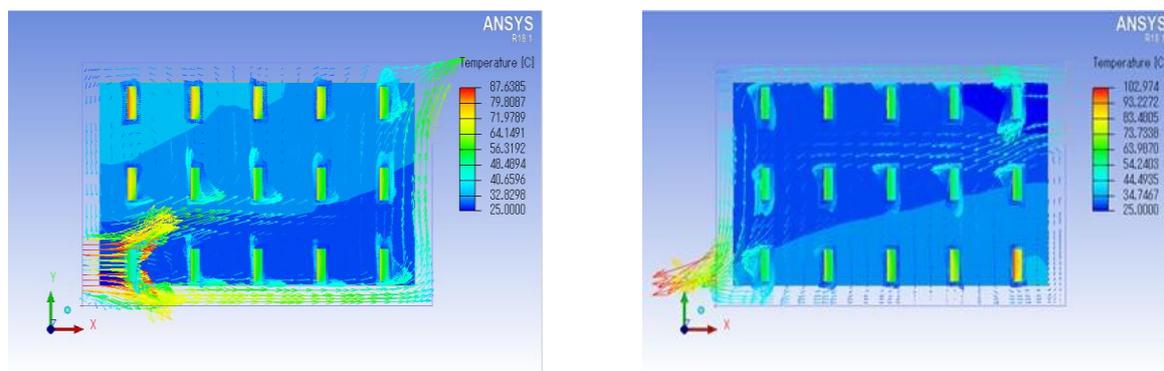


図 8 間隔を空けた配置の MOSFET 熱抵抗 (左) 吸込みファン、(右) 吐出しファン

表 8 間隔を空けた各 MOSFET 熱抵抗 (左) 吸込みファン、(右) 吐出しファン											
MOSFET 熱抵抗 (°C/W)					MOSFET 熱抵抗 (°C/W)						
No.	A	B	C	D	E	No.	A	B	C	D	E
5	31.2	29.2	27.9	26.8	23.3	5	23.9	27.7	25.9	23.4	19.1
4	—	—	—	—	—	4	—	—	—	—	—
3	28.4	21.8	21.3	22.9	23.4	3	23.2	25.4	23.3	21.9	24.9
2	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—
1	17.0	20.3	21.9	23.5	21.4	1	23.2	27.1	29.2	30.9	38.9
Max : 31.2 Ave : 24.0 σ : 3.87					Max : 38.9 Ave : 25.9 σ : 4.65						

5. 実機モデル（モデル2）

モデル1では、MOSFET単体での解析を行いました。モデル2では、実機に近づけるためその他の部品を配置してMOSFET熱抵抗がどのようになるかを解析していきます。

5.1. 吸込みファン

図9にモデル2の部品配置図（基本配置）を示します。これを用いて吸込みファン（3ヶ所）とグリル（3ヶ所）の組み合わせモデルの温度分布図と流速図を図10~12に示します。モデル2ではMOSFETは、計4つ搭載されており、それぞれの熱抵抗を表9にまとめました。

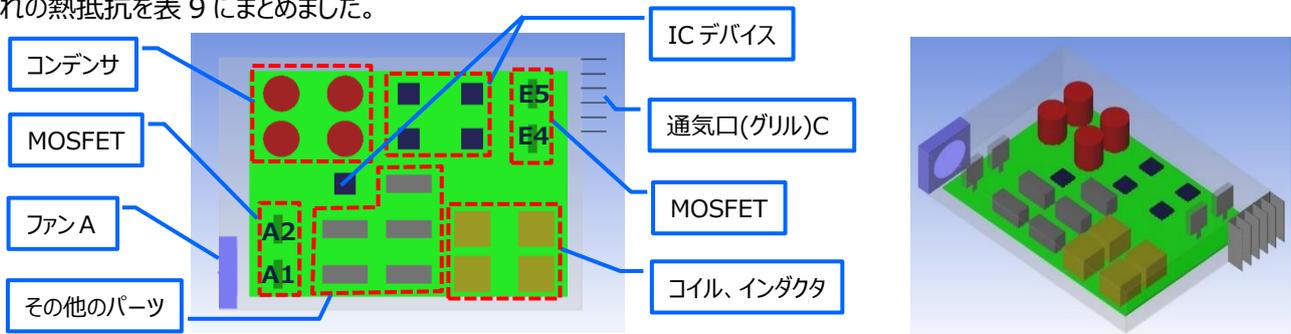


図9 部品配置図

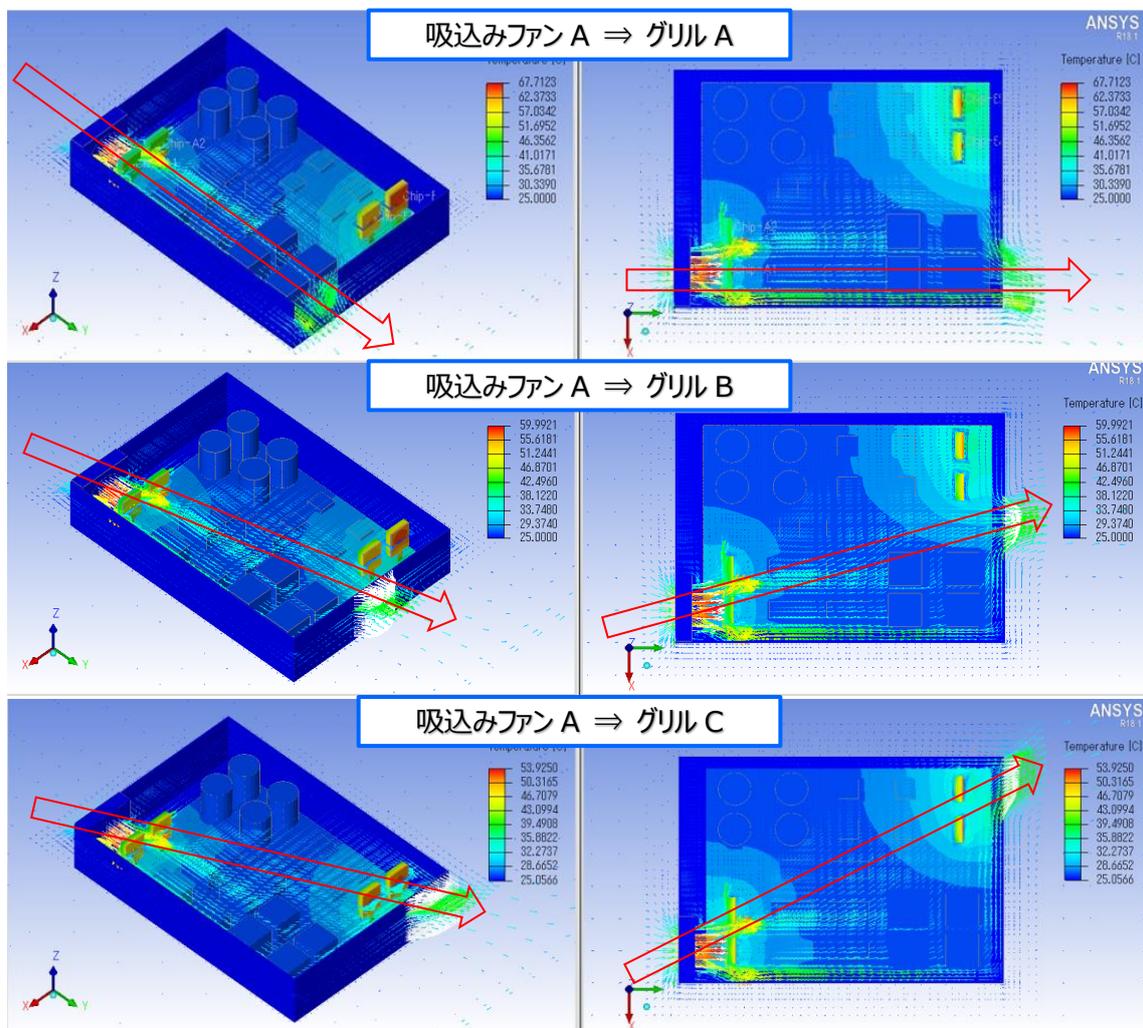


図10 モデル2、吸込みファンモデルの温度分布と流速分布（ファンA）

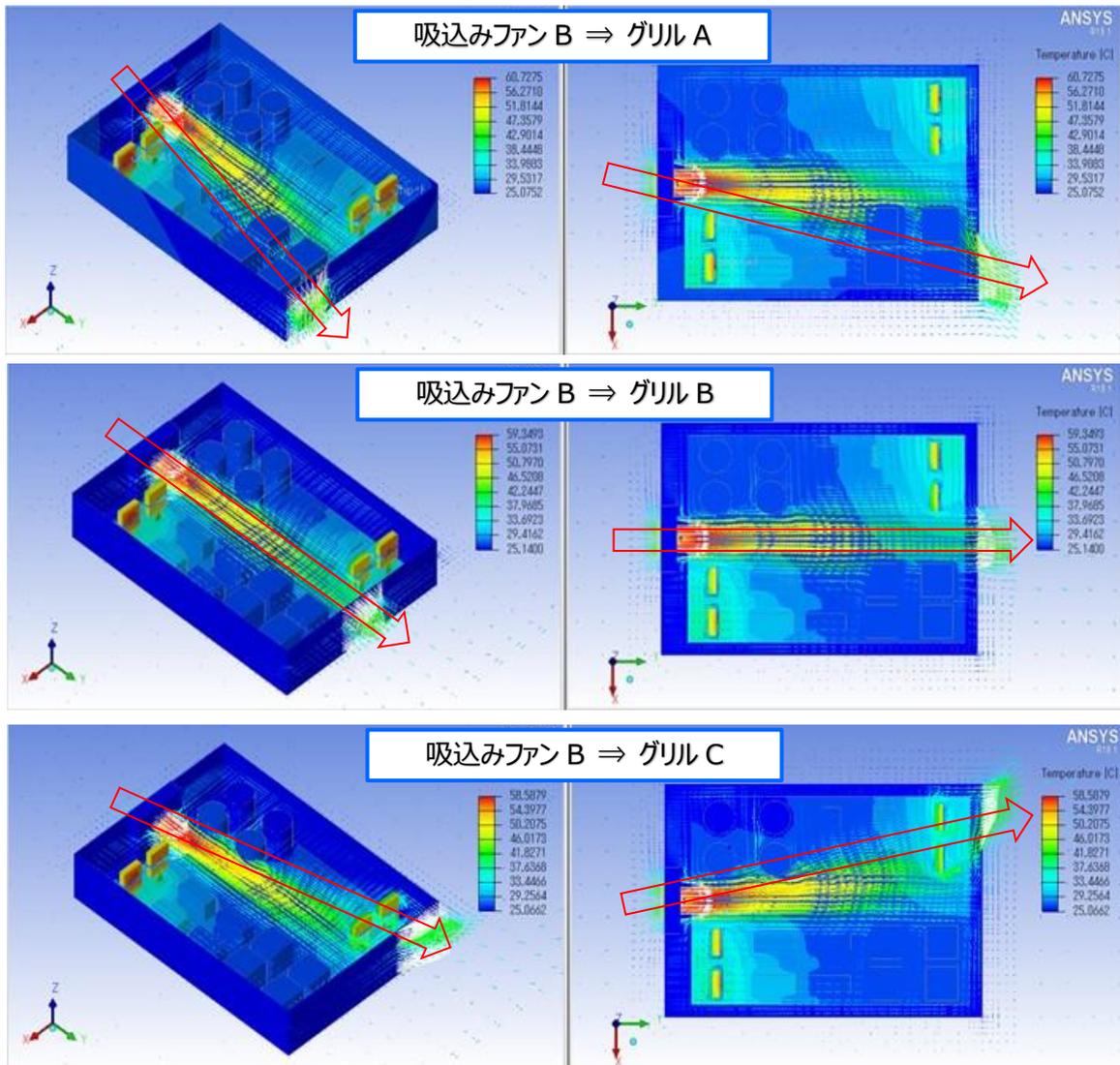


図 11 モデル 2、吸込みファンモデルの温度分布と流速分布 (ファン B)

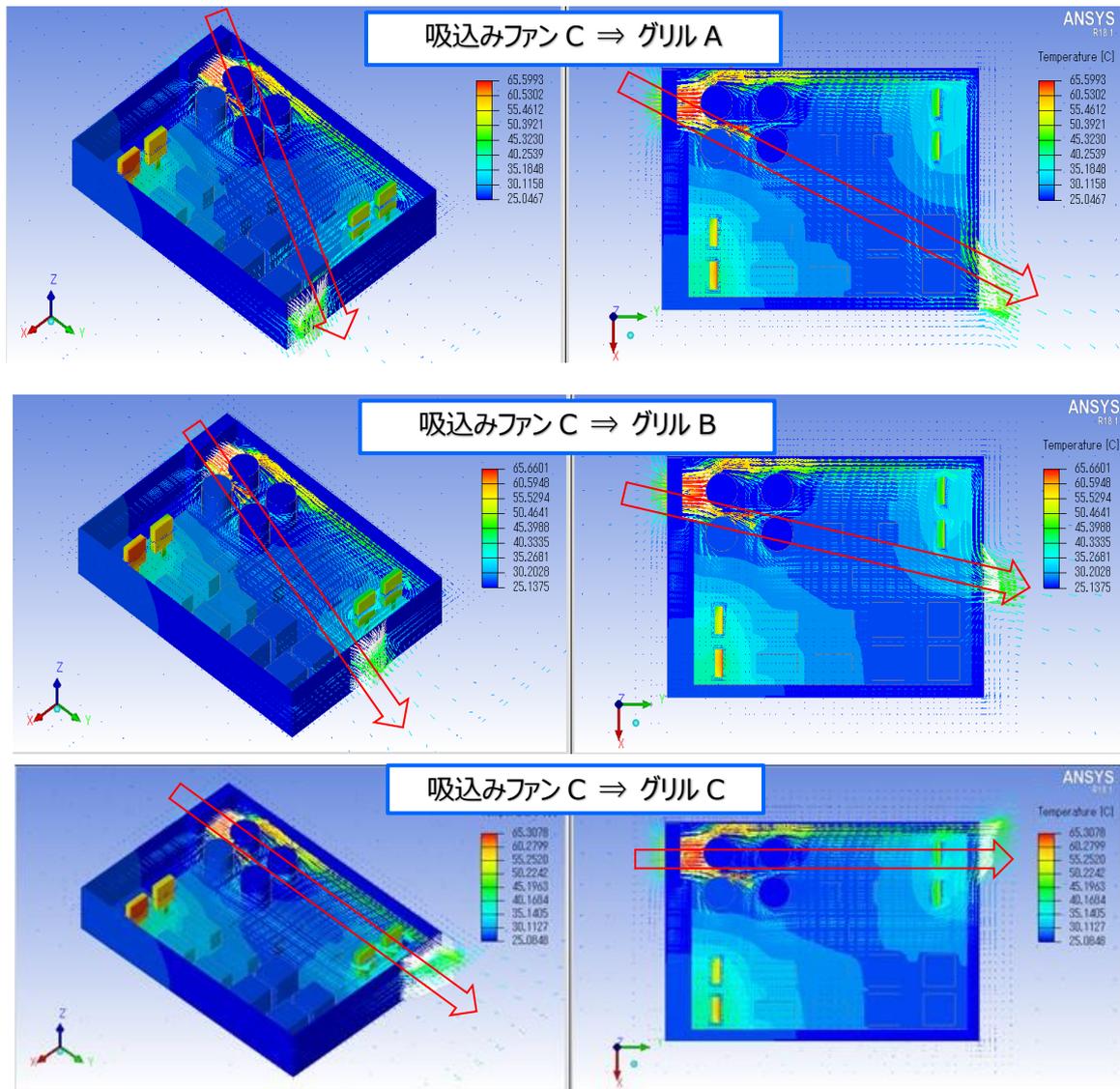


図 12 モデル 2、吸込みファンモデルの温度分布と流速分布（ファン C）

表 9 モデル 2、吸込みファンモデルの MOSFET 熱抵抗

吸込みファンモデル MOSFET 熱抵抗 (°C/W)									
ファン位置	A			B			C		
グリル位置	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Chip-A1	12.7	12.7	12.7	17.7	17.0	16.6	20.1	20.2	20.0
Chip-A2	13.0	13.0	12.9	15.7	15.6	16.0	18.1	17.9	18.2
Chip-E4	19.2	15.5	14.0	15.5	14.8	13.3	14.7	14.3	14.4
Chip-E5	21.2	17.3	14.3	16.9	16.5	13.7	14.6	14.3	14.0

MOSFET の配置を見ると A1 と A2、E4 と E5 がほぼ同じ位置に配置されています。各条件について見てみると、まず、ファン A は A1、A2 の正面にあり、どちらの MOSFET にも同様の効果を示しております。これはグリル位置の影響を受けていないのがわかります。続いて E4、E5 は、最も近いグリル位置は C であり、ファン A から入った空気がグリルに向かうためこのように熱抵抗が下がったと考えられます。MOSFET がグリル位置から遠ざかるほどに熱抵抗が上昇しており、グリルに近いほうがより冷却に有利であることがわかります。

次に、ファン B の場合では、A1 は風の吹き出し方向から遠いため熱抵抗は上がってしまいます。A2 も同様に熱抵抗が上昇しました。対して E4 はファン B からの風が直接当たり、E5 は筐体壁面に当たった風の影響により熱抵抗が下がっています。ファン B 正面には風に対する障害物が少ないため直接奥の筐体壁面まで風が届き、後方の MOSFET (E4、E5) を

冷却できるようになったと考えられます。

最後にファン C ですが、正面に大きな電解コンデンサを配置しているため横方向にある A1、A2 への冷却効果は、低くなっております。一方、E4、E5 にファン C からの風が電解コンデンサに当たり、後方に行くに従い広がるため、ほどほどの冷却効果が得られています。またグリル C は、MOSFET のすぐ後方にあり、ここに空気が流れこんだ場合、最も熱抵抗が下がることがわかります。

3つのファン位置を比べると、ファン B は、極端な高温部がなく平均的な温度分布に近いことがわかります。ファン A は、直接 MOSFET に風を当てることは高温部品を積極的に冷却する際には、有効な手段と思われれます。また、逆に吸入口付近への配置が困難な場合は、ファン C の例に従い排気口付近に配置することも考えられます。

5.2. 吐出しファン

4.1 のモデルを用いて筐体内の空気を外部に吐出すファンモデルの解析を行いました。吐出しファン（3ヶ所）とグリル（3ヶ所）の組み合わせモデルの温度分布図と流速図を図 13~15 に示します。

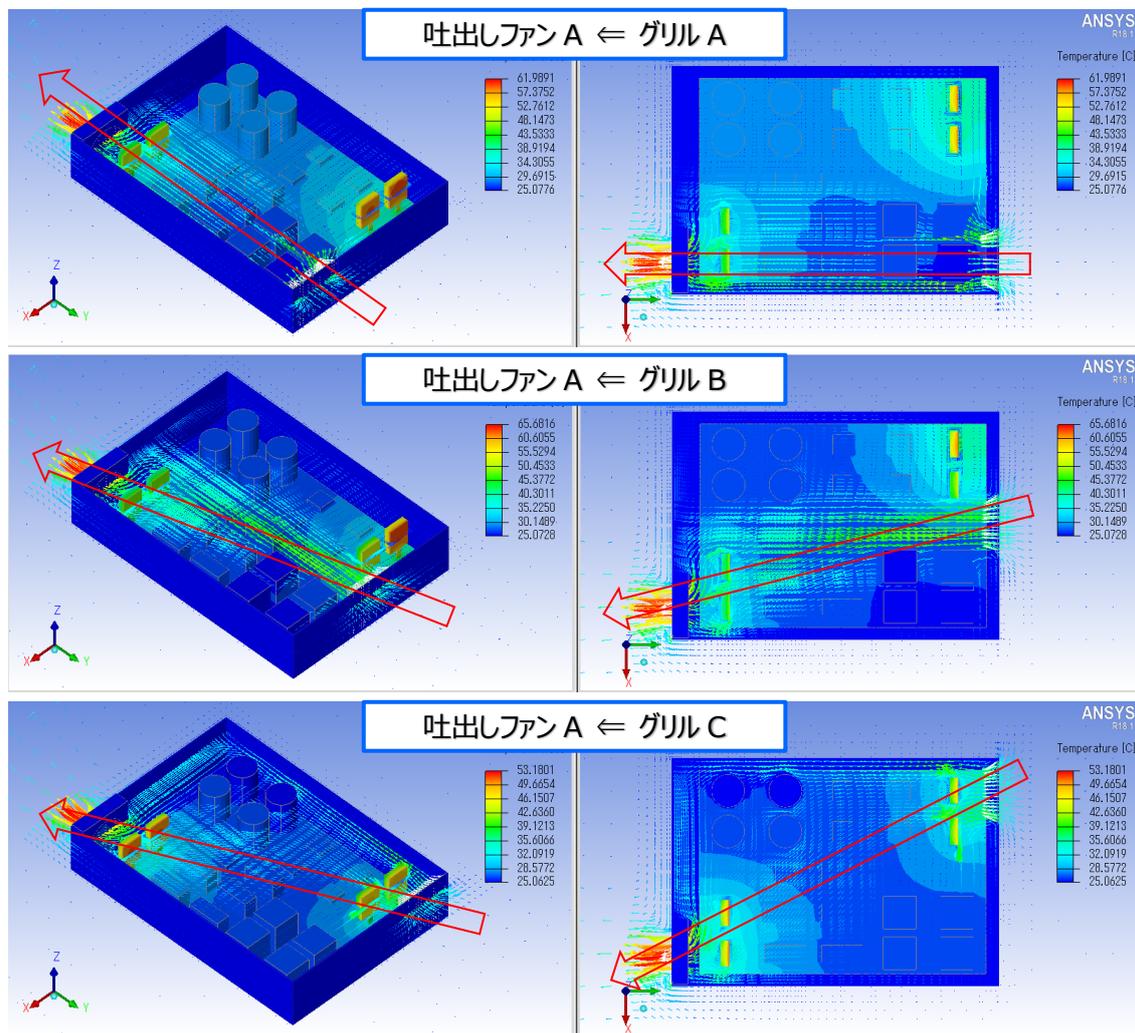


図 13 モデル 2、吐出しファンモデルの温度分布と流速分布（ファン A）

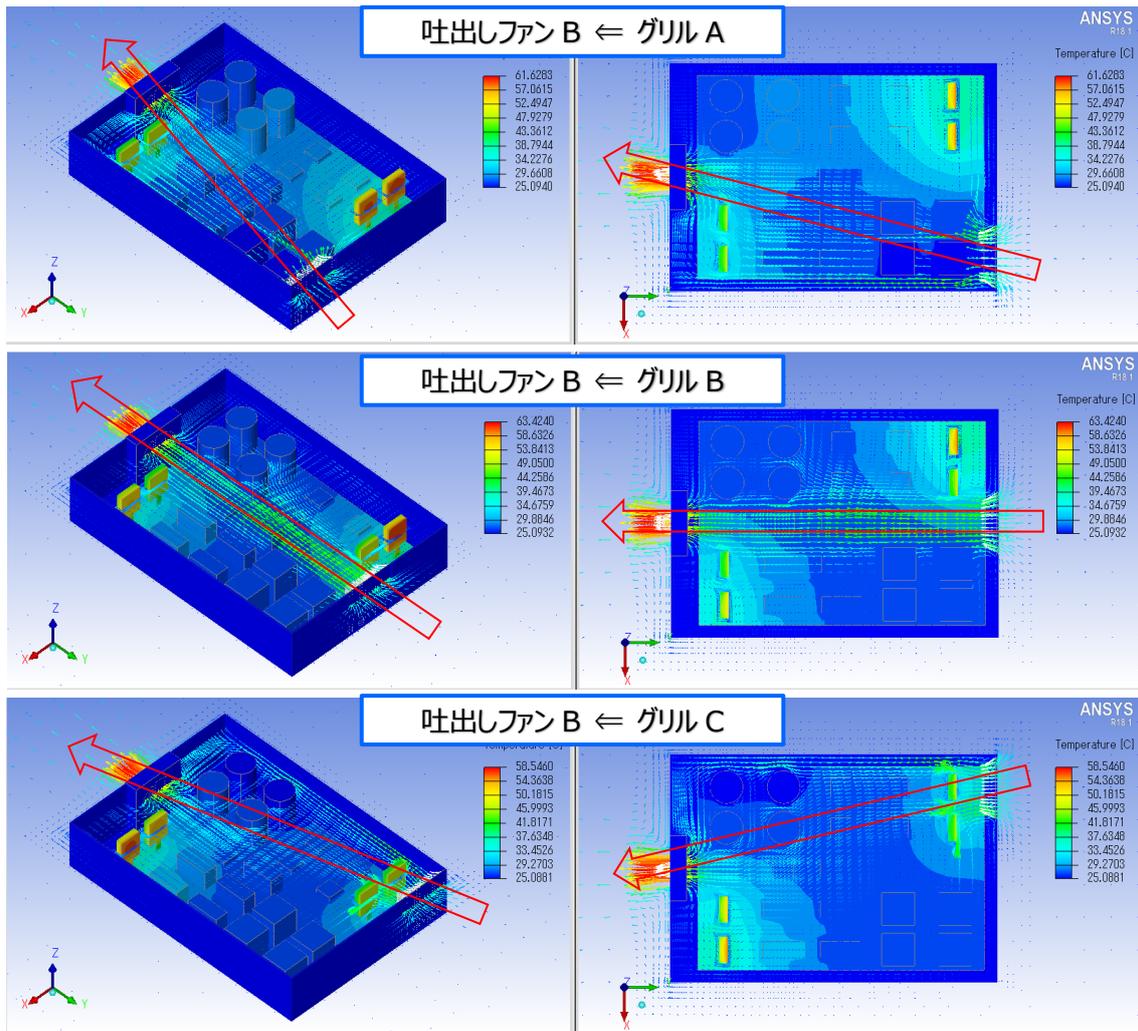


図 14 モデル 2、吐出しファンモデルの温度分布と流速分布 (ファン B)

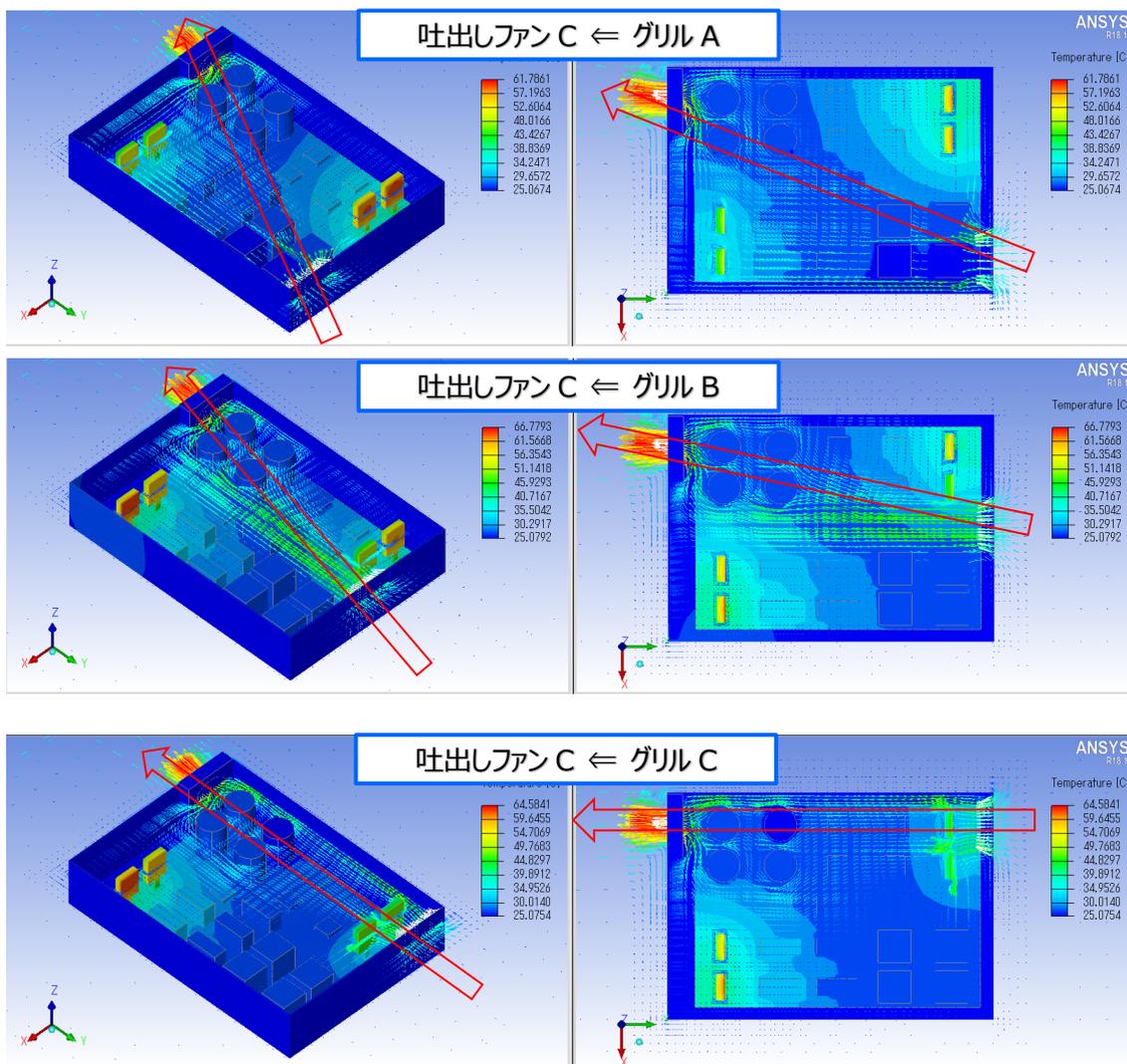


図 15 モデル 2、吐出しファンモデルの温度分布と流速分布（ファン C）

表 10 モデル 2、吐出しファンモデルの MOSFET 熱抵抗

吐出しファンモデル MOSFET 熱抵抗 (°C/W)									
ファン位置	A			B			C		
グリル位置	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Chip-A1	13.4	13.2	13.9	13.9	16.6	16.6	14.4	20.7	19.6
Chip-A2	13.8	13.0	13.8	13.5	14.0	14.9	14.0	18.5	17.6
Chip-E4	18.1	15.5	12.5	18.0	14.8	12.5	18.0	14.7	12.6
Chip-E5	18.3	20.2	12.7	18.2	19.0	12.7	18.2	19.2	12.8

吐出しファンでは、モデル 1 の MOSFET 全発熱に見たように吸込みファンと比べて筐体内の風速が劣るため、熱抵抗は高めになると推測されます。(表 10) 部品の配置などが流速に影響を与えることも考えられます。部品が少なく、十分な風量、風速が確保できる場合に有効でばかりでなく、流れる経路を見極めることが重要であると思われます。またグリルの開口サイズにより風量が変わるため、より効果を望むならば、開口部の検討も必要であると考えます。(6 項参照)

6. グリルの影響

前項を考慮し、吐出しファンに対するグリルサイズの影響を見てみました。吐出しファンをB位置に固定し、相対する筐体壁面にグリル（吸気口）を配置し（図 16）、そのグリルの大きさを変えた際、筐体内に置かれた MOSFET 熱抵抗をプロット(実線)しました。(図 17) チップ 1、2、3、4 はグリルサイズが変わっても熱抵抗の変化は小さいのですが、後方に置かれたチップ 5、6 は、グリルに近い影響が大きいことがわかります。筐体内を広く冷やすためにはグリル（開口）を大きくとることが効果的と考えられます。参考のため、同様の条件で吐出しファンを吸込みファンに換えた時の MOSFET 熱抵抗をプロット(破線)しました。全チップともグリルサイズが変わっても熱抵抗の変化は小さく、影響は小さいことがわかります。

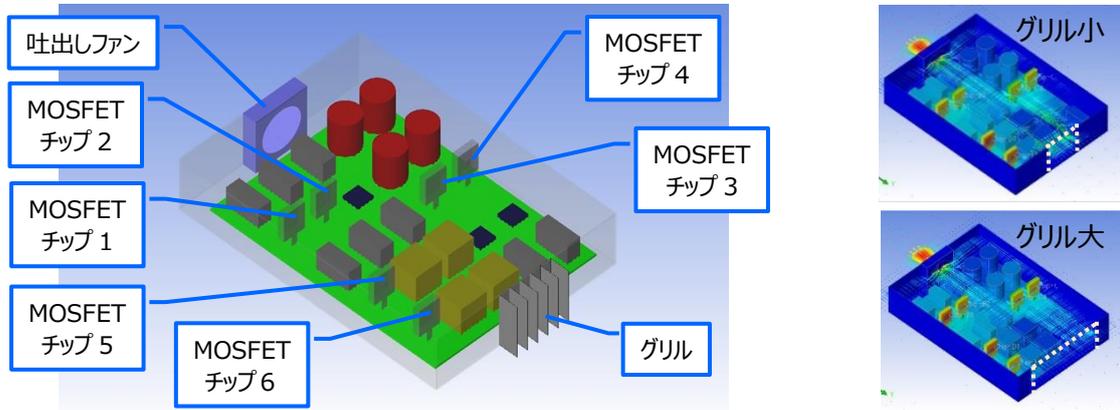


図 16 グリルサイズ確認モデル

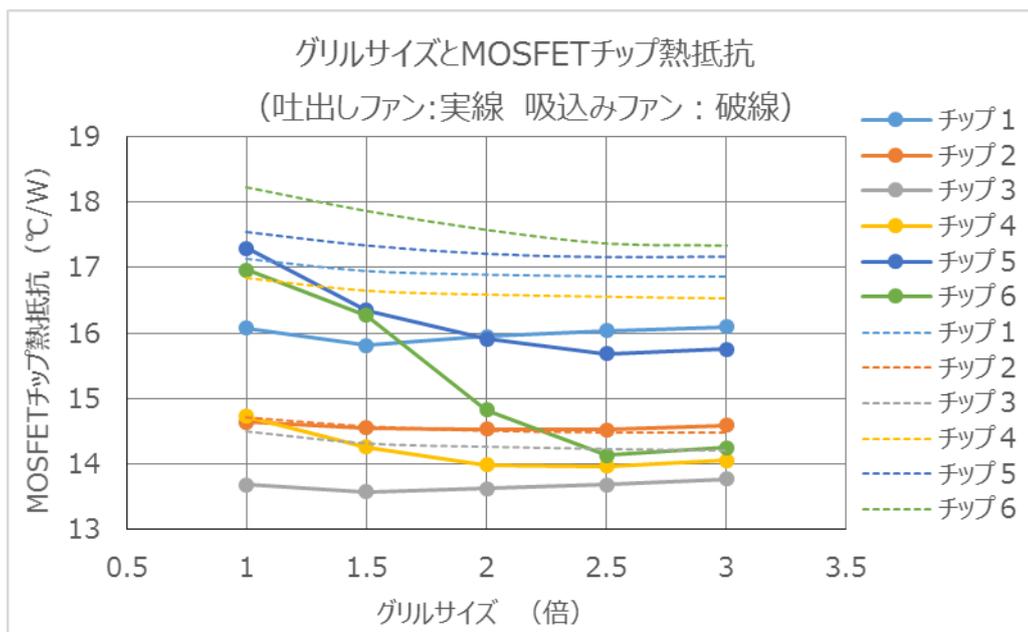


図 17 グリルサイズに対する MOSFET 熱抵抗

7. 自然空冷と強制空冷

つぎに、自然空冷と強制空冷での効果の違いを見比べてみます。自然空冷は放熱により温まった空気の流れ（自然対流）によって冷却を行います。一方、強制空冷はファンなどを使い、自然には発生しえない空気の流れによって冷却します。自然対流による空気は、生じる浮力により重力と逆向きに上昇していきます。上昇する空気に代わり周辺より新たな空気が流れ込み、その空気に発熱体から熱が熱伝達により移動し、再び上方に流れていきます。これを繰り返すことによって発熱体の温度は安定します。このことより、自然対流に用いる筐体は、上面に空気が抜ける開口部が必要になります。強制空冷の場合は、ファンとグリルで空気の流れをコントロールするため、必ずしも開口部は上面にある必要はありません。またファンで強制的に、流れを作るため、自然空冷よりもはるかに流速が速く、冷却効果は高くなります。ただしコスト面は、ファンや機構設計などが必要になり、不利になります。

実際に2つのモデルを使い、どの程度の差が生じるかシミュレーションしました。自然空冷は筐体の上面をすべて開口部として設定してあります。強制空冷は、モデル2で用いたファンA、グリルCモデルを使っています。なお、内部部品の配置はどちらも同じにしてあります。(図18)

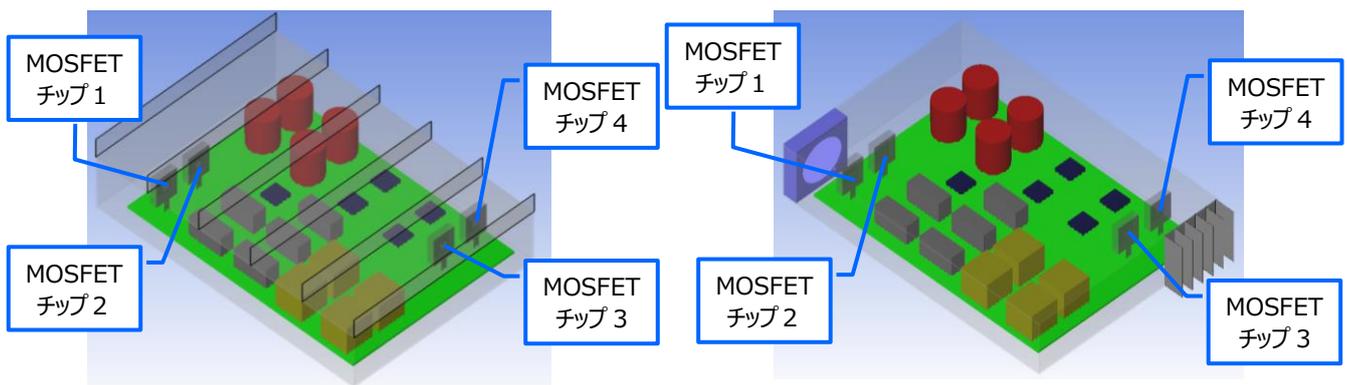


図 18 自然空冷モデル (左) と強制空冷モデル (右)

図19に上記モデルのMOSFET電力損失を振った際の各MOSFETのチップ温度をプロットした(絶対最大定格との比較のためチップ温度を表示します)ものを示します。赤線が自然空冷、青線が強制空冷になります。また実線は筐体に近い端側(チップ1、4)、破線は基板内側(チップ2、3)に配置されたMOSFETのチップ温度です。これを見るとMOSFETの絶対最大定格温度の150℃に対して、強制空冷の方が有利であり、許容電力損失だけで考えた場合は強制空冷を用いる方が望ましいことがわかります。(熱抵抗は表5注記の式で表されるので、電力損失と反比例の関係にあります。)

また両モデル共に同じ条件でMOSFETに温度差がでています。一見、自然空冷の方は、筐体壁に近い分、対流の効果で温度が下がりそうですが、自然対流の速度はそれほど速くありません。もともと固体-気体間の熱伝達によって放熱されるため壁側よりも内側配置の方が空気の量が多くその分、熱の逃げが多くなるための差と考えられます。一方、強制空冷は、ファン側に近いMOSFETとグリル側のMOSFETとの配置の違いの影響と推測されます。

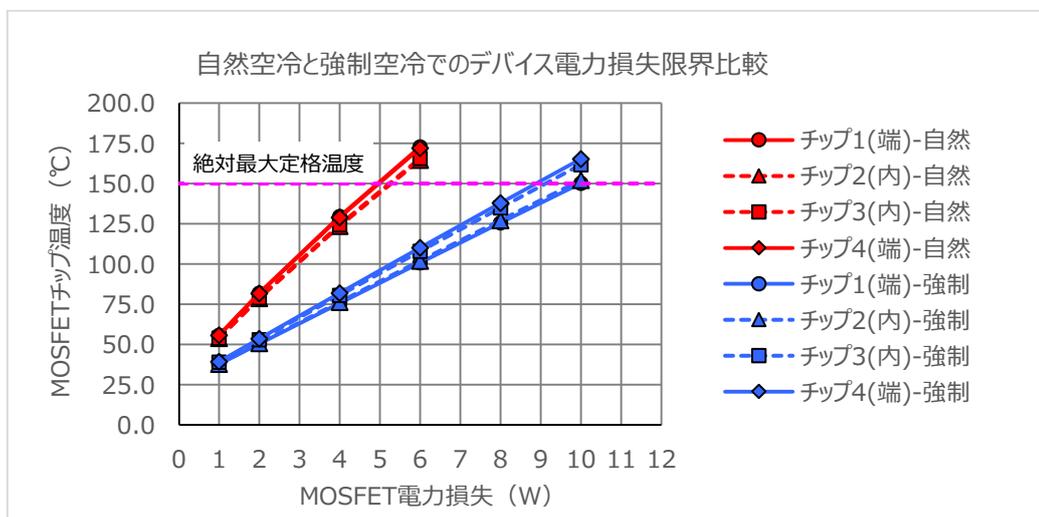


図 19 自然空冷と強制空冷のMOSFETチップ温度差

8. ファンとの距離

強制空冷の場合、ファンと被冷却部品との距離も重要です。以下の2つのモデルで比較しました。(図 20) 一つは比較的空間の広いモデル(左)。もう一つは、ほぼファンと同じサイズ幅のモデル(右)です。それぞれ MOSFET を赤矢印のように動かして MOSFET 熱抵抗を比較しました。

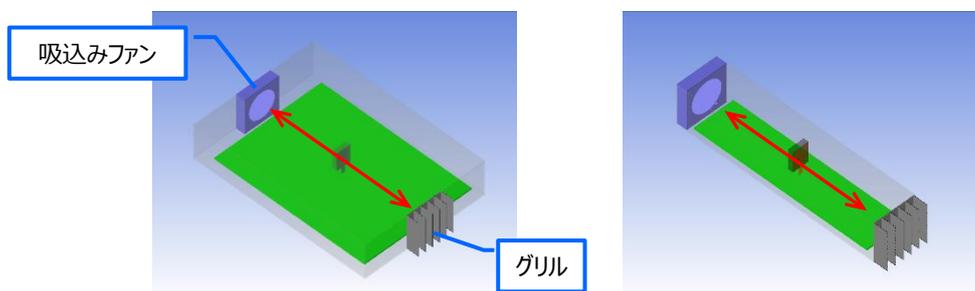


図 20 ファン - MOSFET 間距離を変えたシミュレーションモデル (ファンとグリルは同じ大きさ)

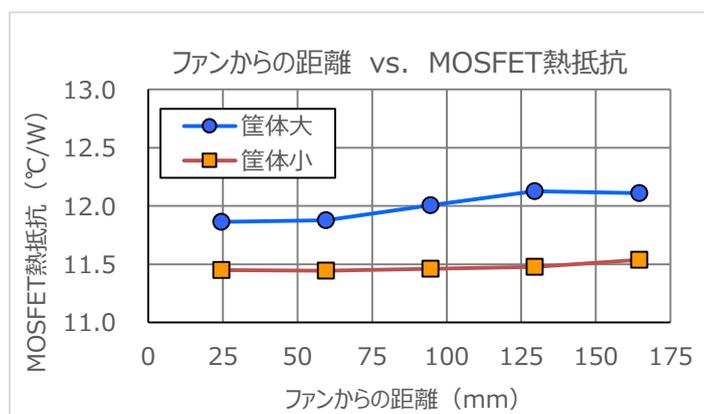


図 21 ファンからの距離に対する MOSFET 熱抵抗

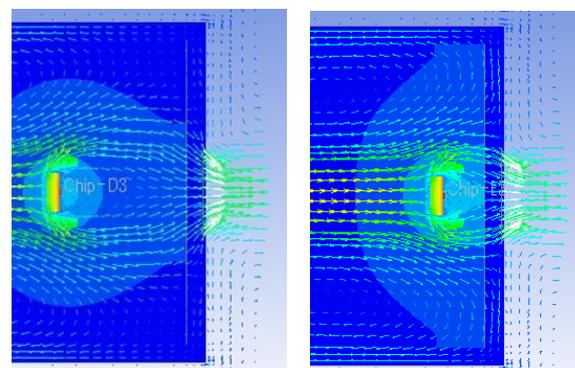


図 22 大きい筐体での MOSFET 後方の風の流れ

これを見ると筐体が狭く密封度の高い小さな筐体では、距離が離れても MOSFET の熱抵抗は低く、大きくは変わりません。一方、大きい筐体では吸い込んだ風が広がり、距離が離れるほどに流速が落ちるため冷却効果が下がり MOSFET 熱抵抗が上がります。(図 21) ただ一番遠い MOSFET 熱抵抗は下がっております。これは後面にグリルがあるため、ファンから入り、一旦広がった空気がグリルに向かって集中した流れのためと考えられます(図 22)。

9. ファン性能

ファンの性能を表す上で、P – Q 曲線が良く使われます。P – Q 曲線は、P は静圧を示し、Q は風量を示します。(図 23) これらは、ファンの特性を決める上で重要な項目であり、使う筐体規模により、それにあったファンを選ぶ指標となります。そこで今回は図 23 の 3 つの P – Q 曲線の異なるファンを用いて図 24 の解析モデルで冷却の効果を比べました。

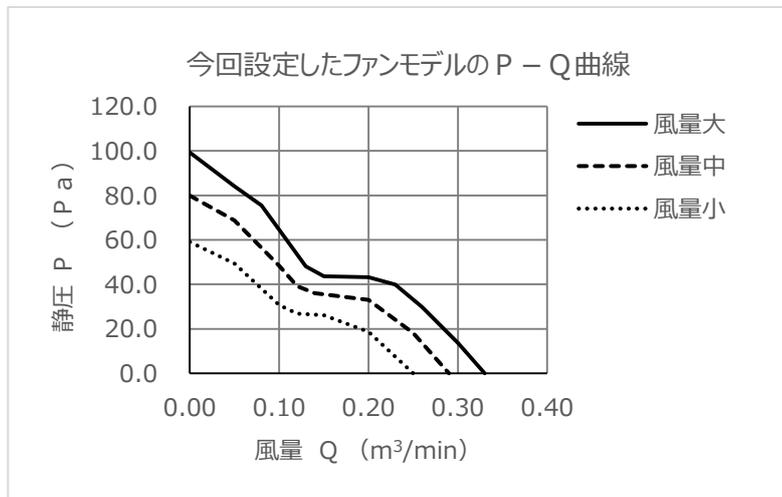


図 23 ファンモデルの P – Q 曲線

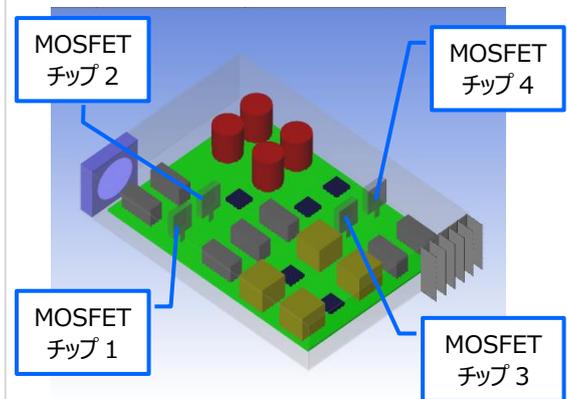


図 24 解析モデル

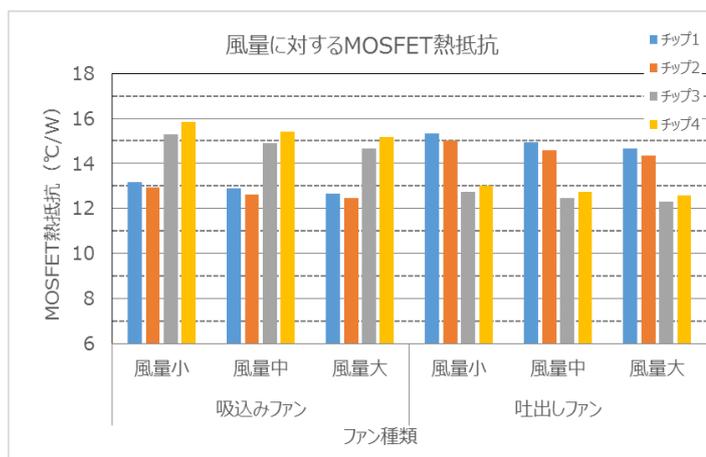


図 25 ファン性能別 MOSFET 熱抵抗比較

表 11 ファン性能別 MOSFET 熱抵抗 (°C/W)

ファン性能	吸込みファン			吐出しファン		
	風量小	風量中	風量大	風量小	風量中	風量大
チップ 1	13.2	12.9	12.7	15.3	14.9	14.7
チップ 2	12.9	12.6	12.4	15	14.6	14.3
チップ 3	15.3	14.9	14.7	12.7	12.5	12.3
チップ 4	15.8	15.4	15.2	13	12.7	12.6

図 25、表 11 を見ると風量が大きいものほど、MOSFET 熱抵抗が低くなっているのがわかります。また今回の配置では、吸込みファンでは、ファンに近い側、吐出しファンではグリルに近い側の MOSFET 熱抵抗が低くなっています。これは、先に示したファンとグリルをつないだ線上での効果が大きくなるのと同じ結果です。

このように風量を大きくするのは、冷却に有利ですが、ファンの高性能化によるコスト増や騒音などの問題もあるため、より適切なファン選択が必要になります。

10. 内部放熱器について

筐体内で特に発熱の大きい部品には放熱器を使用します。その際、どのような向きで放熱器を取り付けるのが有効かをシミュレーションしてみました。モデルは、簡単のために小さな筐体の中央に放熱器をつけた MOSFET を配置してあります。(図 26)

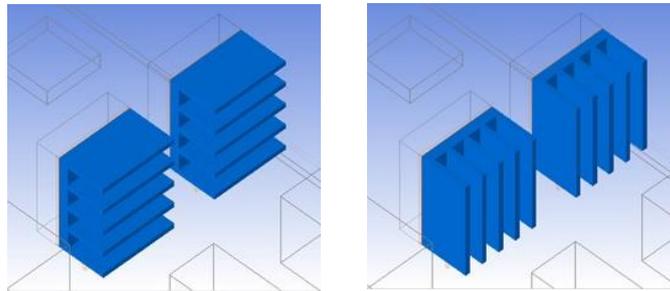


図 26 放熱器の向き (左) 水平、(右) 垂直

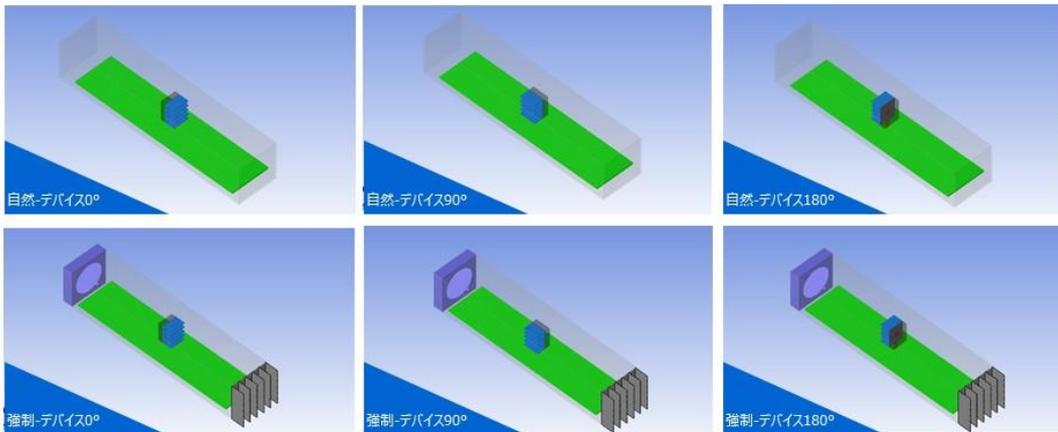


図 27 放熱器の方向の影響確認モデル

上段は自然空冷、下段は強制空冷モデルを示しています。MOSFET はファンに対しての 0° (表面对向)、90° (直角)、180° (裏面对向) の角度で相対しています。(図 27)

表 12 放熱器の向きが MOSFET 熱抵抗に及ぼす影響

冷却方法	放熱器		MOSFET 熱抵抗 (°C/W)		
	有無	向き	デバイス方向		
			0°	90°	180°
自然	無	—	23.2	23.2	23.2
自然	有	水平	19.6	19.6	19.6
自然	有	垂直	18.9	19	18.9
強制	無	—	11.5	11.4	11.3
強制	有	水平	7.4	6.4	6.5
強制	有	垂直	7.1	7.2	6.1

放熱器の向きが MOSFET 熱抵抗に及ぼす影響を表 12 に示します。自然空冷では、筐体内の放熱器を垂直に置くのがもっとも効果があります。当然ながら向きには、よりません。一方、強制空冷では、放熱器を付けない場合、180°の風を MOSFET 発熱部に当てる場合が最も熱抵抗が下がります。(MOSFET モデルのモールド裏面の金属露出部を指す) ところが放熱器をつけると放熱器の向きや風の流れ方向によって熱抵抗が変わります。最も効果があるのは放熱器に直接、風が当たる場合です。風が当たる面積が大きいほど熱抵抗は低くなります。

図 28 に強制空冷で放熱器を垂直に置いた場合の放熱器周辺の風の流れを示します。いずれも図中、左から風が来ており、放熱器方向 0°では、放熱器の両端周辺の流れによって冷却されます。放熱器方向 90°では主に風が当たるのは左端のフィンのみになります。また放熱器方向 180°では放熱器フィン間にも流れがあり、そのため冷却効果が高く熱抵抗が下がると考えられます。事実、シミュレーションでは放熱器 90°が最も熱抵抗が高く、180°が最も低い結果になっています。

水平方向に置いた場合では放熱器 90°は、そのフィンが風の通る方向と同じであるため風が当たる面積がふえて冷却効果が上がっています。内部フィンに風が当たり難い放熱器 0°より熱抵抗は下がっています。このように同じ放熱器でも配置や

向き(水平、垂直)によって効果が変わるため、実験やシミュレーション等で確認するのがよいと思われます。

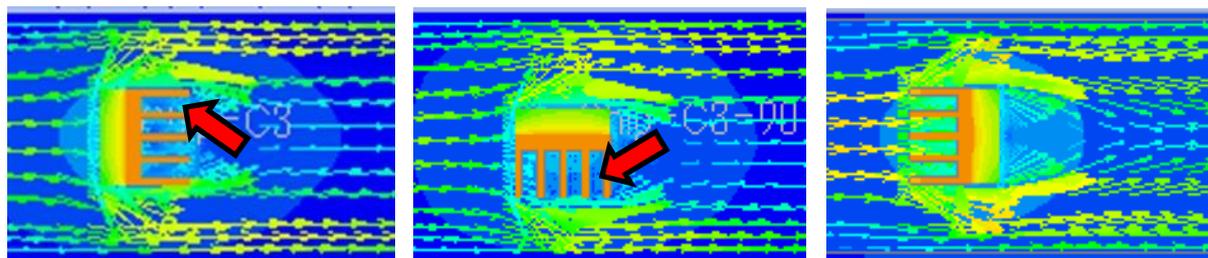


図 28 放熱器周辺の流速分布

(左から放熱器方向 0°、90°、180°。放熱器内側は流れが小さく冷却への寄与が小さい(赤矢印))

11. 筐体放熱器について

限られた大きさの筐体内においては、MOSFET に前項で述べたような放熱器を配置することが難しい場合があります。また基板レイアウトの関係で、筐体壁面付近など十分に風が通らない場所に配置せざるを得ないときもあります。このような場合、筐体を放熱器として利用することでチップの温度を下げるすることができます。図 29 にモデルを示します。左が放熱器なしでファンの風のみモデルです。右がアルミ板にて筐体と接続したモデル（筐体放熱器）です。このほかに、比較のため MOSFET 個別に放熱器をつけたモデルも解析しました。また筐体放熱器には絶縁のため絶縁シート（TIM：Thermal Interface Materials）を挿入したモデルとしています。個別放熱器についても同様のモデル化をしています。

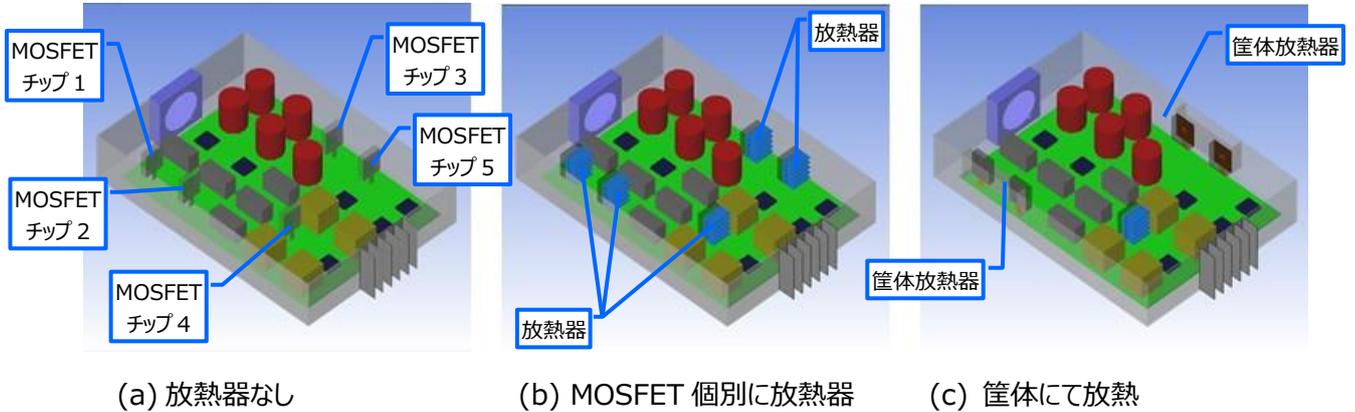


図 29 筐体放熱器モデル

表 13、図 30 に結果を示します。筐体を放熱器として使用した 4 つの MOSFET はいずれも大幅に MOSFET 熱抵抗が下がることが分かります。MOSFET のチップ 4 は、基板中央部にあるため筐体放熱器は使用しておりません。それでも若干熱抵抗が下がるのは、他の MOSFET の向きを変えたための風の流の影響と思われる。

このように放熱に関しては有利である熱伝導を利用した筐体放熱ですが、筐体形状の設計などが必要になります。また今回のモデルはアルミを想定しましたが材料によっては思うような効果が得られない場合もあります。また筐体の温度も上がるため、人が直接触れるような場合は注意が必要になります。

表 13 筐体放熱器の MOSFET 熱抵抗

筐体放熱モデル	MOSFET 熱抵抗 (°C/W)			備考
放熱器	(a)	(b)	(c)	
チップ 1	18.1	12.8	5.8	—
チップ 2	16.5	11.3	5.7	—
チップ 3	16.6	12.4	5.5	—
チップ 4	13.6	10	9.6	筐体放熱器なし
チップ 5	17	13	5.5	—

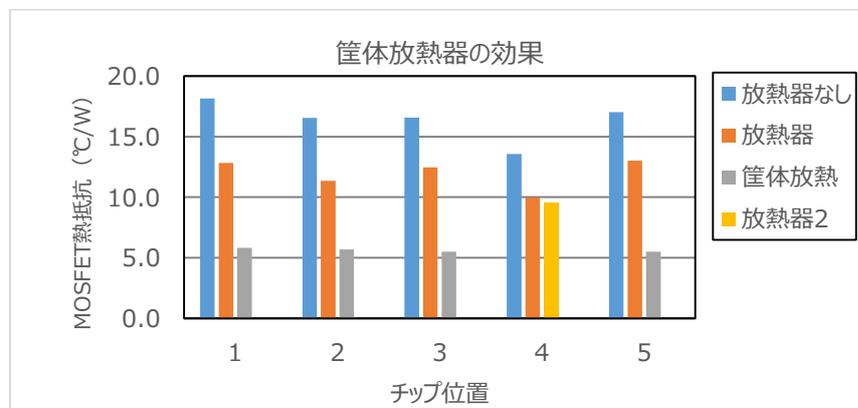


図 30 筐体放熱器の効果

製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。

本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスケア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。